



44ª RAPv | **18º ENACOR**
44ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO | 18º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA
4ª Expopavimentação
Os caminhos da integração . O maior evento rodoviário do País.
18 a 21 de agosto de 2015 . Hotel Bourbon . Foz do Iguaçu . PR

**44ª RAPv – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO
E
18º ENACOR – ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA**

Foz do Iguaçu, PR – de 18 a 21 de Agosto de 2015

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA MISTURA SOLO – ESCÓRIA DE COBRE –
CIMENTO PORTLAND PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE
PAVIMENTOS**

***GUILHERME BRAVO DE OLIVEIRA ALMEIDA¹; MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE² &
ERINALDO HILÁRIO CAVALCANTE³***

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental da mistura de um solo de características areno-argiloso do Estado de Sergipe, 10% de escória de cobre pós-jateada e cimento Portland numa proporção de 0, 3, 5, 7 e 9%, com o objetivo de avaliar as melhorias na matriz do solo natural atribuídas àquela porcentagem da escória para esses diferentes teores do aditivo. O solo natural e a mistura do solo e 10% de escória foram submetidos aos ensaios de caracterização (análise granulométrica, limites de Atterberg e massa específica dos grãos), compactação (Proctor Intermediário) e resistência à compressão simples. A escória de cobre pura somente foi submetida ao ensaio de caracterização. Ao solo natural e à mistura foram adicionados os teores de cimento e submetidos aos ensaios de compactação, resistência e limites de Atterberg. Os dados demonstram que a resistência foi cerca de 35% maior que 2,1 MPa, para 9% de cimento misturado ao solo puro, e para 3% de cimento o índice de plasticidade reduz menos que a metade do solo puro. Ao adicionar 10% da escória de cobre, a resistência aumenta em torno de 39% a mais do que 2,1 MPa para um teor de 7% de cimento e em torno de 87% para um teor de 9% do aditivo e a plasticidade reduz menos que a metade do solo puro para 3% de cimento. Os resultados permitiram concluir que a adição de cimento na mistura solo e 10% de escória tende a diminuir a umidade ótima, aumenta a resistência, altera a ação modificadora para aglutinadora das partículas do solo, reduz o teor de cimento e reduz fortemente a plasticidade.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de Solo, Escória de Cobre, Cimento Portland, Ensaios Laboratoriais

¹ Doutorando em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio e-mail: gbravo1982@gmail.com

² Professora do Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, e-mail: michele_casagrande@puc-rio.br

³ Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe – UFS, e-mail: erinaldo@ufs.br



ABSTRACT

This paper describes an experimental study of the mixture of a clayey sand soil of State Sergipe, 10% blasted copper slag and Portland cement in a ratio of 0, 3, 5, 7 and 9% with the objective to evaluate the improvement in the natural soil matrix assigned to that percentage of slag for these different additive levels. The natural soil and a soil admixture with 10% slag were submitted to the characterization tests (sieve analysis, Atterberg limits, and density bulk), compaction (Proctor Intermediate) and unconfined compressive strength. The copper slag was only subjected to the characterization. In the nature soil and in mixture was added cement content and submitted to compaction, strength and Atterberg limits. The data showed that strength was about 35% higher the 2,1 MPa, for 9% cement the natural soil mixed, and 3% cement reduces the plasticity index unless than half of natural soil. By adding 10% copper slag, strength increases about 39% higher than 2,1 MPa for 7% cement, and about 87% for 9% cement and reduces the plasticity unless half of natural soil for 3% cement. The results showed that addition of cement to the soil admixture with 10% copper slag tends to decrease the optimum moisture, increase strength, change the modifier action for unifying of soil particles, decreases the cement content and greatly reduces the plasticity.

KEY WORDS: Stabilization of Soil, Copper Slag, Cement Portland, Laboratory Tests

INTRODUÇÃO

A estabilização de solos para utilização em pavimentos, seja em sub-base ou base, tem se mostrado bastante eficiente à medida que as exigências da qualidade construtiva são crescentes, além das exigências no quesito durabilidade. De fato, se os solos naturais, que cumprem os requisitos necessários para determinada função a que se destinam, estão escassos e muitas vezes distantes dos pontos de utilização tornando-se economicamente inviáveis, a estabilização de solos surge como uma opção viável, principalmente, no que diz respeito aos aspectos econômico, técnico e ambiental. Dentre os métodos de estabilização, a estabilização química tem como base as reações químicas que englobam um apreciável número de processos entre as partículas de solo, a água e os agentes estabilizadores. Dessa forma, é possível obter um solo com características melhores do que o solo puro.

Segundo Sherwood (1995), citado por Cruz (2004), por meio dessa técnica de estabilização é possível empregar solos locais que, devido a sua baixa qualidade não poderiam ser utilizados isoladamente, pois não se adequariam ao exigido pelas especificações para a construção de bases e sub-bases. Além disso, o uso de solos estabilizados em vez de agregados naturais, cada vez mais escassos, pode ter consideráveis vantagens ambientais e econômicas.

Marangon (1992) cita alguns dos possíveis agentes estabilizantes: cimento, cal, betume, produtos de escória de alto forno (cinza volante), ácido fosfórico, cloreto de cálcio e de sódio, sulfato de lignina. O cimento Portland pode ser usado quer para modificar e melhorar a qualidade do solo quer para transformar o solo numa massa cimentada com maior resistência e durabilidade. A quantidade desse estabilizante utilizado dependerá do fato de o solo ser modificado ou estabilizado (DEPARTMENTS OF THE ARMY, THE NAVY, AND THE AIR FORCE, 1994).

Na literatura podem ser encontradas diferentes denominações da mistura de solo e cimento: solo estabilizado, solo melhorado, solo modificado, solo tratado. O critério para adoção de uma ou outra denominação é o grau de alteração das propriedades do solo natural em função da quantidade de cimento adicionado. Vale destacar que os processos são os mesmos, isto é, introdução e mistura de cimento Portland ao solo com o objetivo de obter propriedades adequadas a determinado uso na engenharia (FOPPA, 2005).

Perante essas denominações far-se-á uma distinção segundo o DNIT (2006):

✓ solo-cimento: é uma mistura devidamente compactada de solo, cimento Portland e água que deve satisfazer a certos requisitos de densidade, durabilidade e resistência, dando como resultado



um material duro, cimentado, de acentuada rigidez à flexão. O teor de cimento adotado usualmente é da ordem de 6 a 10%;

✓ solo melhorado com cimento: é obtido com adição de pequenos teores de cimento, cerca de 2 a 4%, visando primordialmente à modificação de solo no que se refere à sua plasticidade e sensibilidade à água.

Concha (1986) descreve que em solos coesivos, o cimento a hidratar-se desenvolve fortes pontes entre partículas do solo formando uma matriz que o encaixa dentro dele. Essa matriz é muito efetiva na fixação das partículas, tal que elas não podem deslizar uma em relação às outras. Assim, o cimento não só destrói a plasticidade, como ainda prevê um incremento na resistência ao cisalhamento.

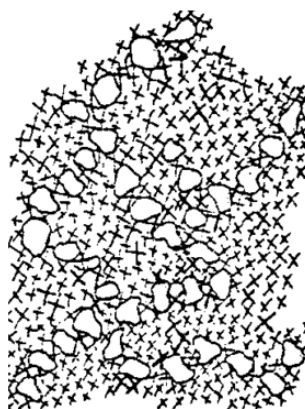
Belincanta et al. (2006) descrevem que no concreto a pasta de cimento envolve completamente os sólidos inertes, solidarizando-os através de ligações fortes e resistentes e nos solos, mesmo naqueles granulares, o cimento geralmente não envolve totalmente os sólidos, sendo os mesmos somente solidarizados em seus pontos de contato.

As reações químicas desenvolvidas pelo cimento, ou seja, as reações de hidratação são a origem do endurecimento da mistura solo-cimento. Dependendo o teor do agente estabilizante, a ação estabilizadora do cimento pode ocorrer segundo dois mecanismos distintos como descreve Pereira (1970) citado por Cruz (2004):

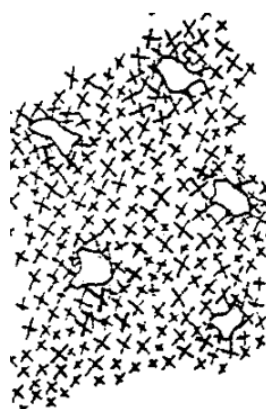
✓ ação aglutinante que cimenta as partículas de solo permitindo o aumento da resistência mecânica. Para essa ação, o teor de cimento é mais elevado e forma núcleos interligados distribuídos pela massa de solo (Figura 1.a);

✓ ação modificadora da fração argilosa que diminui a plasticidade do solo, podendo ser ou não acompanhada do aumento de resistência mecânica, uma vez que o cimento, nestes casos, forma núcleos independentes na massa de solo (Figura 1.b).

a)



b)



○ Partícula de cimento × Partícula de solo

Figura 1. Esquema de solo: (a) alto teor de cimento e (b) baixo teor de cimento (CATTON, 1962, apud CRUZ, 2004).

O uso da técnica da engenharia geotécnica, como a substituição de solos impróprios, é muitas vezes problemático, não só por seus altos custos, mas ainda por razões ambientais, seja a inviabilidade de extrair solos distantes do local da obra ou de construir em solos de baixa capacidade de carga. A



alternativa de melhorar o solo local com adição de cimento Portland pode ser uma excelente solução (FONSECA, CRUZ e CONSOLI, 2009).

A estabilização de solo com cimento é uma maneira eficiente de reconstrução de pavimentos, uma vez que 90% do material já estão no local, reduzindo os custos com transporte, manuseio e conservando os materiais de alta qualidade para outros fins (PCA, 2014).

A qualidade da mistura final de solo e cimento depende de muitos fatores, pois podem influenciar diretamente na sua resistência. Segundo Marangon (1992), a bibliografia especializada tem considerado como sendo relevantes alguns fatores: granulometria do solo, grau de compactação, tipo e tempo de cura associado à temperatura, tempo entre a mistura e sua compactação, quantidade de água na hidratação do cimento e a homogeneização da mistura, quantidade de cimento (e.g. ENAMORADO, 1990; CRUZ, 2004; MACÊDO, 2004; FOPPA, 2005; PORTELINHA, et al., 2012; JUNG et al., 2012, MAKUSA, 2012).

Marangon (1992) descreve que solos de granulometria mais fina, como a argila, são menos indicados para a estabilização com cimento, enquanto que solos de granulometria mais grossa são mais indicadas, sendo que os bem graduados requerem um teor de cimento ainda menor, pois as numerosas áreas de contato entre as partículas produzirão uma ação cimentante mais forte. Para areias de graduação uniforme, que têm um menor número de áreas de contato entre os grãos, necessitam um maior teor de cimento.

Escória de cobre

A atividade de produção do cobre gera volumes significativos de escória durante o processo de transformação das matérias-primas em produtos acabados. A nível mundial, 13 milhões de toneladas de escória de cobre são geradas, sendo no Brasil a média de 230 mil toneladas anuais (MOURA, 2000). De acordo com Gorai e Jana (2003) estima-se, para cada tonelada de cobre produzida, cerca de 2,2 toneladas de escória geradas e, por ano, aproximadamente 24,6 milhões de toneladas de escória são geradas mundialmente.

Várias são as aplicações da escória de cobre destacadas por Moura (2000), Gorai e Jana (2003), Al-Jabri et al. (2006) e Resende (2009). Dentre as possíveis aplicações cita-se: ferramenta de corte, produtos cerâmicos, vidro, abrasivos, camadas de pavimento, substituição parcial do cimento, agregado em mistura de cimento.

Investigações sobre a escória de cobre granulada mostrou melhoras nas propriedades mecânicas, podendo ser aplicadas em ferramentas abrasivas para a usinagem em metais não-ferrosos, madeiras e plásticos (GORAI e JANA, 2003). Resende (2009) descreve que a escória de cobre é muito adequada à decapagem de superfícies metálicas devido ao seu baixo custo, dureza e granulometria, sendo essas características comparáveis às dos materiais abrasivos tradicionais. Quando a escória de cobre é utilizada com a finalidade abrasiva denomina-se granalha de cobre e após o seu uso, já não apresenta a mesma granulometria nem a mesma constituição química.

Estaleiros, refinarias, indústria automobilística usam o jateamento a seco, e como abrasivo a escória de cobre, para remoção de ferrugem, revestimento antigos e outras impurezas, uma vez que essa escória apresenta propriedades de dureza, alta densidade e baixo conteúdo de sílica livre, proporcionando um excelente acabamento na superfície (KAMBHAM et al. 2007).

Segundo Resende (2009), apesar de Portugal não ter produção de escória de cobre, existem depósitos desse material após a sua utilização como abrasivo no tratamento de revestimentos metálicos. A granalha utilizada por esse autor provém dos Estaleiros Navais de Viana do Castelo que consomem cerca de 4.700 toneladas do abrasivo e desde 2004 que a granalha de cobre usada por esses estaleiros é crivada, transportadas para cimenteiras e reutilizada como matéria-prima no cimento. Os grãos dessa granalha são menores sofrendo reduções de 2,5 mm para 1 mm e



quimicamente está incorporado uma quantidade significativa de partículas muito finas de óxido de ferro e partículas de tinta.

Como camadas do pavimento, nos trabalhos de Moura (2000) foi detectado, através do ensaio de compactação, que a escória de cobre pura não apresentava adesão e que a água exsudava facilmente. No entanto, em misturas contendo 65% de escória e 35% de solo areno-argiloso, a mistura apresentava um excelente material para base de pavimento, com um ISC 74% superior ao estabelecido pela norma DNER-ME 50/1979, a qual admite um suporte mínimo de 40%. Para uma mistura de brita, escória de cobre e solo areno-argiloso, o ISC foi de 77%.

Para a utilização da escória de cobre como agregado miúdo em asfalto pré-misturado a frio, Moura (2000) descreve que a escória apresentava segregação, devido a sua elevada massa específica e para minimizar esse efeito foram elaboradas misturas com escória de ferro-cromo como agregado graúdo e emulsão de ruptura lenta (RL-1C) e ruptura média (RM-1C). Os melhores resultados foram apresentados com a mistura de ruptura lenta, não havendo segregação em ambas as misturas.

Moura (2000) ainda verificou a utilização da escória de cobre em mistura com emulsão em diversas proporções. Apesar de apresentar uma ótima adesividade, não foi possível realizar ensaios Marshall (DNER – ME 107/1979) nas misturas, uma vez que os corpos-de-prova desagregaram a 60 °C.

Como camada drenante em pavimentos, Moura (2000) cita que a escória acusou um coeficiente de permeabilidade médio de 0,038 cm/s e associado a sua massa específica, aponta um bom desempenho como colchão drenante e camada estabilizadora em pavimentos de paralelepípedo.

Diante desse contexto, essa pesquisa experimental tem como objetivo analisar as variações na resistência à compressão simples e na redução da plasticidade numa mistura de solo, 10% de escória de cobre pós-jateada (granalha de cobre) e diferentes teores de cimento Portland, seguindo a hipótese de que um dos fatores que influencia a estabilização é a granulometria do solo, a qual será alterada com adição de 10% de escória.

MATERIAIS E MÉTODOS

O ponto de coleta do solo utilizado no experimento foi no município de São Cristóvão (SE), nas coordenadas 10° 58' 36" S e 37° 14' 16,3" W, próximo à BR-101. A partir de uma caracterização tátil-visual do solo, nota-se a presença de pedregulho, areia e de certa plasticidade, além da sua cor avermelhada, como pode ser observada na Figura 2.



Figura 2. Ponto de coleta do solo usado nessa pesquisa.

O cimento Portland usado na estabilização foi o CP V-ARI (cimento Portland de alta resistência inicial) e a escolha por esse tipo de cimento foi baseada na composição química, que apresenta



menores adições na fabricação desse cimento, sendo o mais puro encontrado no comércio local para ser adicionado ao solo e escória de cobre. Os teores do aditivo adicionados em todas as misturas foram 3, 5, 7 e 9% em relação à massa de solo seco e à massa do solo e escória secos.

A escória de cobre utilizada nessa pesquisa provém de serviços de jateamento a seco de tanques de petróleo, a qual é usada como abrasivo na preparação da superfície externa do tanque para aplicação de uma nova pintura, conforme se observa da Figura 3.a. Após a terceira repetição no processo de jateamento e esgotada sua capacidade abrasiva, a escória foi coletada no canteiro de obras (ANJOS, 2014). A Figura 3.b mostra a escória de cobre pós-jateada utilizada nos experimentos.

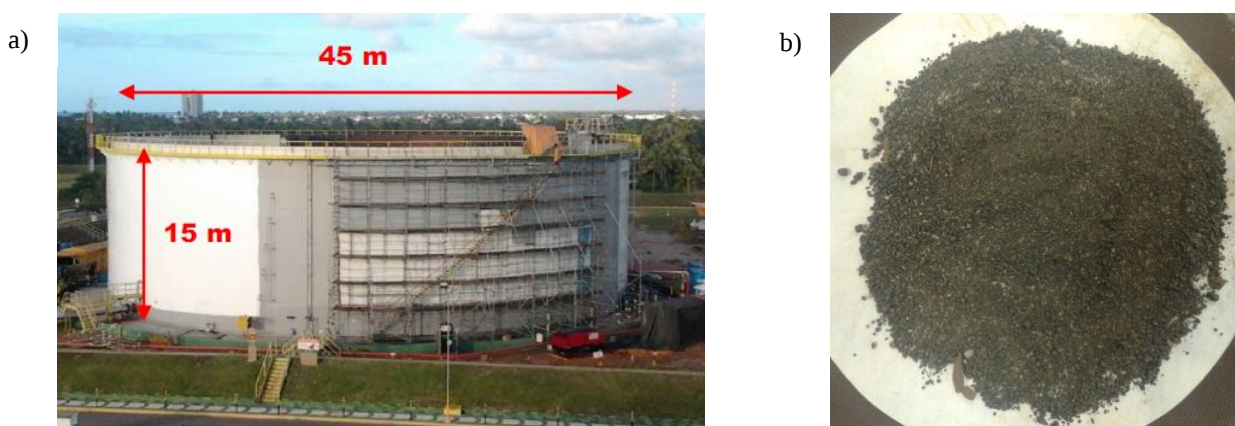


Figura 3. Escória de cobre: (a) serviço jateamento em tanque de petróleo (ANJOS, 2014) e (b) escória de cobre pós-jateada utilizada nos experimentos.

- **Preparação e caracterização do solo**

Na preparação das amostras, o solo foi seco ao ar previamente, destorroado, quarteado e preparado segundo a norma DNER-ME 041/94. Para a caracterização e classificação de acordo com a *Transportation Research Board* (TRB) e a *Unified Soil Classification System* (USCS) os seguintes ensaios foram executados: densidade real (DNER-ME 093/94), análise granulométrica (DNER-ME 051/94), limites de liquidez (DNER-ME 082/94) e limite de plasticidade (DNER-ME 122/94).

- **Escória de cobre**

A preparação da escória de cobre pós-jateada também seguiu a norma DNER-ME 041/94 e para sua caracterização foram executados os seguintes ensaios: densidade real (DNER-ME 194/98), análise granulométrica (DNER-ME 051/94), limites de liquidez (DNER-ME 082/94) e limite de plasticidade (DNER-ME 122/94). A massa de escória adicionada foi de 10% da massa do solo seco em todas as misturas.

- **Compactação do solo e da mistura de solo, escória de cobre e cimento Portland**

A determinação das umidades versus massa específica aparente seca seguiu a norma DNER-ME 129/94, com energia de compactação intermediária de 26 golpes por camada. Nas misturas de solo, escória de cobre e cimento seguiu a norma DNER-ME 216/94 aplicado ao método B, quando usado material que passa na peneira de 19 mm e quando parte da amostra fica retida na peneira de 4,8 mm. Das determinações obtidas foram consideradas aceitáveis aquelas cujos valores não ultrapassaram os limites $\pm 5\%$ da média dos resultados.

Apesar de a norma DNER-ME 216/94 descrever a energia normal para solo-cimento, foi utilizada a energia intermediária, uma vez que a adição da escória de cobre modifica a granulometria do solo e, segundo a norma DNIT 139/2010 – ES, a energia mínima requerida é a intermediária.



- **Moldagem e cura dos corpos de prova**

Para a moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos foi seguida a norma DNER-ME 202/94, conforme o método B, quando usado material que passa na peneira de 19 mm e quando parte da amostra fica retida na peneira de 4,8 mm. Baseado na justificativa descrita no item acima, a moldagem também foi realizada na energia intermediária. O período de cura dos corpos de prova foi de sete dias em câmara úmida a uma temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

- **Resistência à compressão simples (RCS)**

Como parâmetro normativo para o ensaio à compressão não confinada foi utilizada a norma DNER-ME 201/94. Os corpos de prova destinados à dosagem do solo-cimento, após o período de cura de sete dias, foram submetidos à imersão em água por 4 horas. No entanto, os corpos de prova que não continham cimento Portland não foram imersos em água por se desintegrarem ao serem mergulhados. A prensa utilizada foi a Máquina Universal de Ensaio, eletrodinâmica e microprocessada DL 20000 da EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio. O software para aquisição de dados foi o TESC, desenvolvido pela mesma empresa citada e acompanha a máquina de ensaio. Para o ensaio de compressão foram considerados aceitáveis valores que não ultrapassaram os limites de $\pm 10\%$ da média dos resultados.

Como forma de avaliar a perda de plasticidade do solo com as porcentagens de cimento Portland e com adição de 10% de escórias de cobre, os corpos de prova após serem rompidos foram previamente secos, destorroados e repartidos numa quantidade suficiente para a determinação dos limites de liquidez e plasticidade, segundo as respectivas normas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

- **Ensaio com solo *in-natura***

Os resultados da granulometria, dos limites de liquidez e plasticidade, do teor de umidade ótima, da massa específica aparente seca máxima, da resistência à compressão simples e a classificação do solo utilizado nessa pesquisa estão apresentados na Tabela 1.

A granulometria média do solo, segundo a AASHTO, revelou as seguintes porcentagens: 28,37% pedregulho, 49,85% areia, 7,12% silte e 14,66% argila, caracterizando um solo areno-argiloso. As características dos solos do grupo A-2-6 são porcentagens entre 15 e 35% de material passando na #200, porção de finos contendo argila plástica e índice de grupo (IG) variando de 0 a 4. Para o grupo SC, os solos são caracterizados como arenosos com finos argilosos cuja plasticidade pode ser baixa a alta, refletindo mais no comportamento do solo do que na composição granulométrica (DNIT, 2006).

O valor de 16% do IP obtido revela um solo de plasticidade média e a atividade da argila revela um valor de 1,1 não sendo um valor típico de argilominerais expansivos. Porém, a fração fina desse solo reflete bem mais no comportamento plástico do solo, condizendo com a teoria.

No ensaio de compactação, os dois ensaios apresentaram baixa variação, menos do que o limite de $\pm 5\%$ da média dos resultados. No entanto, um dos resultados de resistência à compressão simples ultrapassou os limites de $\pm 10\%$ da média, não sendo considerado no valor da média dos resultados. Como esse solo apresenta variações percentuais de cada fração, não há como induzir um resultado para a RCS, mesmo nos ensaios 2 e 3 apresentarem o mesmo valor de resistência, isso ocorreu ao acaso, diferenciando do ensaio 1. Essa diferença de valores pode ser atribuída ao momento de moldagem, onde a fração mais grossa do solo pode se concentrar numa região do corpo de prova que pode influenciar bastante na resistência do solo.



Tabela 1. Resultados da caracterização e ensaios mecânicos do solo *in-natura*.

	Peneira	E. 1	E. 2			
				E. 1	E. 2	E. 3
granulometria	% que passa da amostra total	2"	100	100		
		1 ½ "	100	100		
		1"	98,49	100		
		¾ "	97,64	98,40		
		⅜ "	88,31	90,91		
		nº 4	80,29	83,94		
		nº 10	69,88	73,36		
		nº 16	64,23	67,38		
		nº 30	50,38	52,49		
		nº 40	42,42	43,98		
		nº 60	32,91	34,17		
		nº 100	25,28	26,62		
		nº 200	21,20	22,35		

		E. 1	E. 2	E. 3
Limite de Liquidez (%)		34	35	-
		34*		-
Limite de Plasticidade (%)		18	18	-
		18*		-
Índice de Plasticidade (%)		16		-
hótima (%)		9,0	8,8	-
		8,9*		-
γ _{dmáx} (KN/m³)		21,21	20,92	-
		21,07*		-
RCS (MPa)		0,72	0,90	0,90
			0,90*	
TRB		A-2-6 (0)		
USCS		SC		

* média dos valores obtidos nos respectivos ensaios

- Ensaio de caracterização da escória de cobre pós-jateada

Os resultados da granulometria, dos limites de liquidez e plasticidade da escória de cobre estão apresentados na Tabela 2.

A granulometria média da escória, segundo a AASHTO, revelou as seguintes frações representadas pelas porcentagens: 0,06% pedregulho, 92,32% areia, 7,13% silte e 0,49% argila. De acordo com a classificação A-3, atribuída a essa escória, o material típico desse grupo é uma areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou possuindo pequena quantidade de silte não plástico. Para o grupo SP, os materiais podem ser classificados como cascalhos uniformes (também chamados macadames), areias uniformes, ou misturas não uniformes de material muito grosso, e areia muito fina, faltando partículas com tamanho intermediário (DNIT, 2006). Quanto aos limites de Atterberg, ambos os ensaios determinaram a não plasticidade da escória de cobre, característica comum para esse tipo de material.

Tabela 2. Resultados da caracterização da escória de cobre pós-jateada.

	Peneira	E. 1	E. 2		
				E. 1	E. 2
granulometria	% que passa da amostra total	2"	100	100	
		1 ½ "	100	100	
		1"	100	100	
		¾ "	100	100	
		⅜ "	100	100	
		nº 4	100	100	
		nº 10	99,93	99,95	
		nº 16	99,40	99,50	
		nº 30	82,34	85,76	
		nº 40	62,66	66,47	
		nº 60	41,45	44,49	
		nº 100	19,86	21,36	
		nº 200	8,02	7,21	

	E. 1	E. 2
Limite de Liquidez (%)	NP	NP
Limite de Plasticidade (%)	NP	NP
Índice de Plasticidade (%)	NP	
TRB	A-3 (0)	
USCS	SP	

- Ensaios com a mistura solo e 10% escória de cobre

Os resultados da granulometria, dos limites de liquidez e plasticidade, do teor de umidade ótima, da massa específica aparente seca máxima, da resistência à compressão simples e a classificação da mistura do solo e 10% escória de cobre utilizada nessa pesquisa estão apresentados na Tabela 3.



Tabela 3. Resultados da caracterização e ensaios mecânicos da mistura de solo e 10% escória de cobre.

	Peneira	E. 1	E. 2		E. 1	E. 2	E. 3
granulometria	% que passa da amostra total	2"	100	100	30	28	-
		1 ½ "	100	96,15	29*	-	-
		1"	100	96,15	17	18	-
		¾ "	96,95	94,90	17*	-	-
		⅜ "	90,19	88,17	12	-	-
		nº 4	84,00	81,60	8,4	8,5	-
		nº 10	75,70	72,29	8,5*	-	-
		nº 16	69,86	66,31	21,64	21,82	-
		nº 30	54,27	50,65	21,73*	-	-
		nº 40	44,31	41,09	0,90	0,85	0,76
		nº 60	34,04	31,57	0,84*	-	-
		nº 100	25,61	23,75	TRB	A-2-6 (0)	-
		nº 200	20,92	19,48	USCS	SC	-

* média dos valores obtidos nos respectivos ensaios

A granulometria média dessa mistura, segundo a AASHTO, revelou as seguintes frações representadas pelas porcentagens: 26% pedregulho, 53,80% areia, 6,59% silte e 13,61% argila. Comparando-se essa granulometria com a do solo *in-natura* observa-se que é na fração areia onde há uma maior variação, cerca de 4%, atribuída a maior concentração dessa fração (92,32%) na escória de cobre. Dentro da fração areia, a porção média contribui com os maiores ganhos. Em relação aos limites de Atterberg, houve uma redução na plasticidade do solo, de 16 para 12, e isso pode ser explicado pela maior porcentagem dessa fração areia da escória que tende a quebrar a ação plástica do solo. Mesmo com a mudança na granulometria e a diminuição na plasticidade, a adição de 10% de escória de cobre não provocou alterações na classificação da mistura pelo sistema TRB e USCS. A Figura 4 mostra as curvas granulométricas do solo, da escória de cobre e da mistura solo e 10% escória de cobre.

Para os ensaios mecânicos, observa-se uma redução de 0,4% no teor de umidade ótima influenciado pelo acréscimo da porcentagem de escória de cobre que diminui a fração que efetivamente absorveria a água da compactação. Observa-se também, um ligeiro aumento no peso específico aparente seco máximo de 0,66 KN/m³, sendo atribuído à densidade da escória de 3,726. Para a resistência da mistura de solo e 10% escória em relação à do solo *in-natura*, houve uma redução de 0,6 MPa e isso pode ser devido ao acréscimo da escória que reduz a coesão do solo, impedindo a ligação natural entre as partículas de argila.

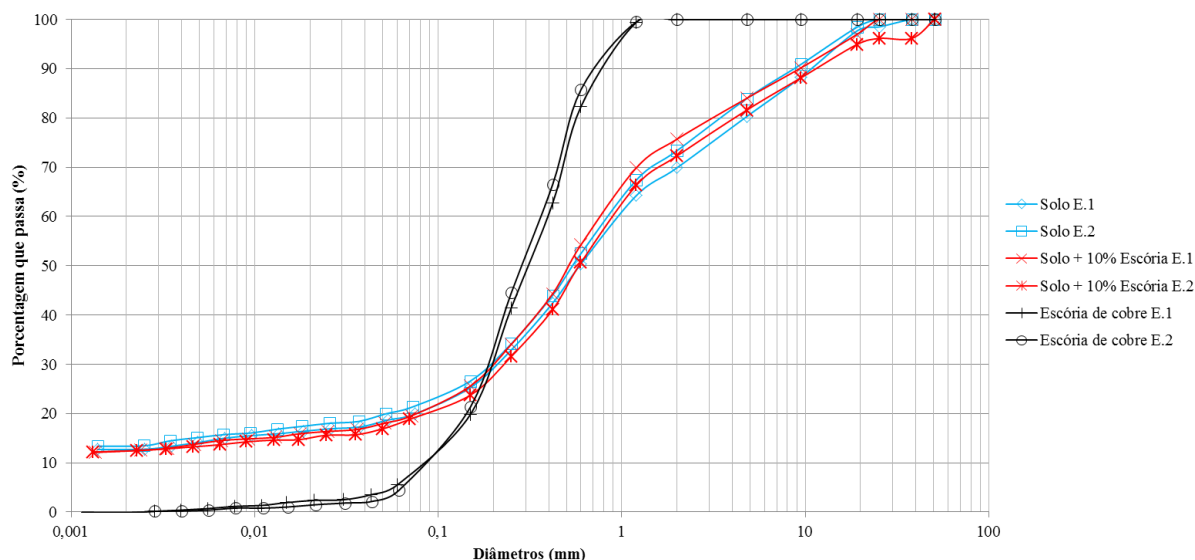


Figura 4. Curvas granulométricas do solo, da escória de cobre e da mistura solo e 10% escória de cobre.

- Ensaios com as misturas solo e cimento Portland

Os resultados da umidade ótima, da massa específica aparente seca máxima e da resistência à compressão simples, após o período de cura de sete dias, para os diferentes teores de cimento adicionados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados dos ensaios mecânicos da mistura solo e cimento Portland.

Teores de Cimento (%)	Compactação				Resistência à Compressão Simples					
	h _{ótima} (%)		γ _{dmáx} (KN/m ³)		h moldagem (%)			RCS (MPa)		
	E. 1	E. 2	E.1	E. 2	E. 1	E. 2	E. 3	E. 1	E. 2	E.3
0	9,0	8,8	21,21	20,92	9,0	8,2	8,6	0,72	0,90	0,90
	8,9*		21,07*		8,6*			0,90*		
3	8,8	9,0	21,07	21,18	8,5	8,6	8,6	1,07	1,08	1,00
	8,9*		21,12*		8,6*			1,05*		
5	8,8	8,8	21,43	21,50	8,4	8,4	8,5	1,31	1,19	1,15
	8,8*		21,46*		8,4*			1,22*		
7	8,6	8,6	21,15	21,31	8,4	8,4	8,6	1,78	1,94	1,97
	8,6*		21,23*		8,5*			1,90*		
9	8,5	8,6	21,27	21,36	8,3	8,5	8,3	2,26	2,87	2,81
	8,5*		21,31*		8,4*			2,84*		

* média dos valores obtidos nos respectivos ensaios

A partir dos resultados do ensaio de compactação observa-se que não há diferença na massa específica aparente seca máxima entre os teores de cimento, isso porque não houve tempo suficiente para que ocorressem as reações do cimento e as partículas do solo. Nota-se também, em relação à umidade ótima, uma tendência de diminuição dessa umidade (0,4%), mesmo com o aumento do teor de cimento que, por ser hidrofílico, exigiria uma maior quantidade de água. Devido a essa variação no teor de umidade para cada porcentagem de cimento, houve uma dificuldade em moldar os corpos de prova na umidade ótima para o ensaio de RCS, ficando as médias das umidades de moldagem variando 0,1 a 0,4% em relação às médias das umidades ótimas. Uma umidade abaixo da ótima faz com que não haja uma lubrificação adequada para um melhor entrosamento entre os grãos do solo, além de reduzir a quantidade necessária de água para a completa hidratação do cimento. Para os valores de resistência à compressão observa-se o seu aumento para maiores teores de cimento Portland e a variação desse aumento é maior para teores acima de 5%, atingindo a



resistência de 2,84 MPa para o teor de 9%. Essa resistência é aproximadamente 35% maior que a resistência mínima de 2,1 MPa descrito na norma DNIT 143/2010 – ES, para utilização em base de pavimento. A Figura 5 mostra os valores de resistência, após sete dias de cura, para cada teor de cimento e solo *in-natura*.

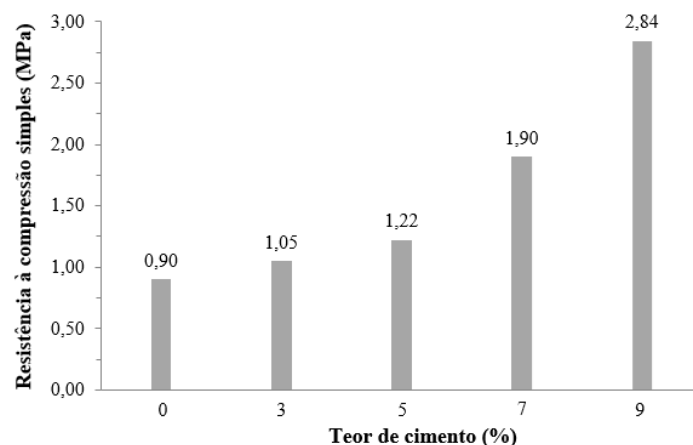


Figura 5. Resistência à compressão simples (MPa) x teor de cimento e solo *in-natura*.

- Ensaio da mistura solo, 10% escória de cobre e cimento Portland

Os resultados da umidade ótima, da massa específica aparente seca máxima e da resistência à compressão simples, após o período de cura de sete dias, para os diferentes teores de cimento adicionados à mistura de solo e 10% escória de cobre pós-jateada estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados dos ensaios mecânicos da mistura solo, 10% escória de cobre e cimento Portland.

Teores de Cimento (%)	Compactação				Resistência à Compressão Simples					
	hótima (%)		$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (KN/m ³)		h moldagem (%)			RCS (MPa)		
	E. 1	E. 2	E.1	E. 2	E. 1	E. 2	E. 3	E. 1	E. 2	E.3
0	8,4	8,5	21,64	21,82	8,4	8,2	8,2	0,90	0,85	0,76
	8,5*		21,73*		8,3*			0,84*		
3	8,4	8,6	22,00	21,85	8,5	8,4	8,1	1,68	1,52	0,86
	8,5*		21,93*		8,3*			1,60*		
5	8,0	8,5	21,68	21,59	8,0	7,9	8,0	2,10	2,25	1,95
	8,3*		21,64*		8,0*			2,10*		
7	8,2	8,4	21,81	21,86	8,7	8,6	8,8	3,08	2,92	2,75
	8,3*		21,84*		8,7*			2,92*		
9	8,5	8,4	21,75	21,98	9,3	9,2	9,3	3,75	4,18	3,82
	8,5*		21,87*		9,3*			3,92*		

* média dos valores obtidos nos respectivos ensaios

Os teores de umidade ótima sofreram uma variação de 0,2% e não tenderam a reduzir com o aumento do teor de cimento, diferentemente dos ensaios com o solo e cimento Portland (Tabela 4). Porém, comparando-se os resultados com e sem adição da escória de cobre na mistura, verifica-se uma redução na umidade ótima devido à porcentagem da escória, conforme já descrito anteriormente. Para a massa específica aparente seca máxima também houve pouca diferença entre os teores de cimento. No entanto, observa-se uma elevação nos valores quando compara as massas específicas sem e com a escória de cobre, e isso está relacionada à densidade da escória.

Os teores de umidade durante a moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão simples apresentaram variações e dentre elas a mais significativa foram para os teores de 7 e 9% de



cimento. Como já discutido anteriormente, houve a mesma dificuldade para atingir a umidade ótima na moldagem dos corpos de prova para a mistura do solo, 10% escória e os teores de cimento. Em termos de resistência, observa-se elevados valores para os teores de 7 e 9% de cimento, respectivamente 39% e 87% superior a resistência mínima de 2,1 MPa descrita na norma DNIT 143/2010 – ES. A Figura 6 mostra os valores de resistência, após sete dias de cura, para cada teor de cimento da mistura solo e 10% de escória.

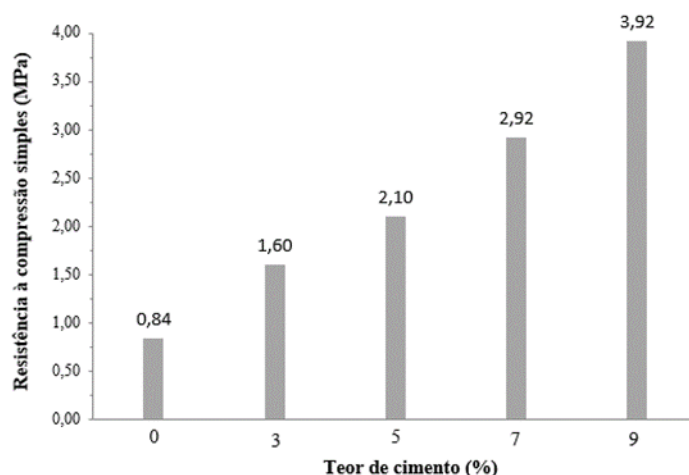


Figura 6. Resistência à compressão simples (MPa) x teor de cimento da mistura solo e 10% escória de cobre.

A Figura 7 mostra uma comparação entre os valores de resistência à compressão simples para cada teor de cimento e solo *in-natura* e da mistura solo e 10% escória. Observa-se que, com a adição de 10% de escória de cobre, foi possível reduzir o teor de cimento, em pelo menos 3%, garantindo a resistência mínima de 2,1 MPa.

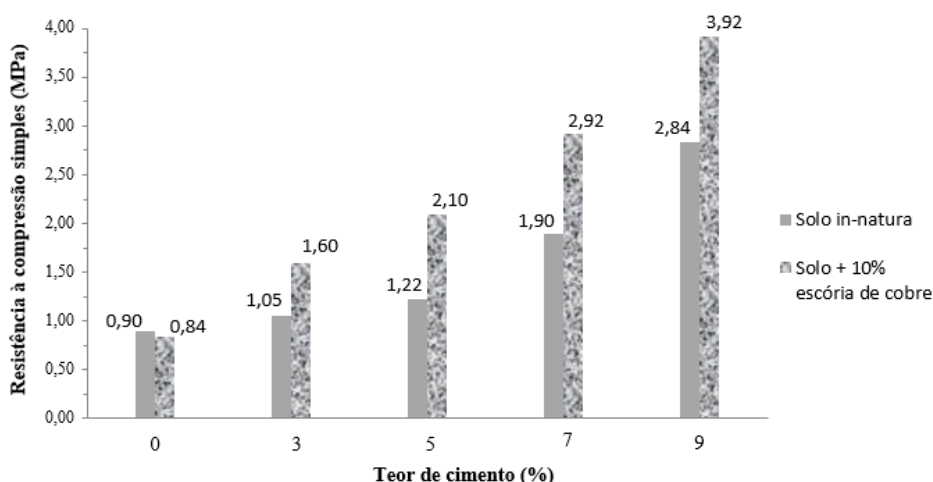


Figura 7. Resistência à compressão simples (MPa) x teor de cimento e solo *in-natura* e da mistura solo e 10% escória de cobre.

Em relação à influência da granulometria, como um dos fatores que pode afetar a estabilidade, observa-se que no ensaio 3 do teor de 3% de cimento (Tabela 5), o valor de resistência à compressão está muito abaixo dos outros dois ensaios. Essa diferença pode ser atribuída ao acúmulo da fração mais grossa na base do corpo de prova, como mostra a Figura 8, que pode causar

fragilidade, não correspondendo ao real valor de resistência. O mesmo ocorreu no ensaio 1 do solo *in-natura*, em que se obteve um valor de resistência abaixo dos outros dois ensaios (Tabela 1).



Figura 8. Corpo de prova do ensaio 3 com 10% escória de cobre e 3% de cimento Portland.

A Figura 9 mostra torrões das misturas após o rompimento à compressão simples. Observa-se das Figuras 9.a, 9.b, 9.e e 9.f que baixos teores de cimento criam núcleos endurecidos com comportamento de partículas granulares e separados, mergulhados na matriz argilosa, caracterizado por apresentar uma ação modificadora da fração argilosa com pouco ganho de resistência. Para teores acima de 5% de cimento, observa-se uma ação aglutinante, isso porque nas maiores porcentagem do aditivo os núcleos formados estão interconectados na matriz argilosa, tornando a resistência ainda mais elevada. Nos torrões mostrados nas Figuras 9.g e 9.h nota-se uma maior fixação entre as partículas do solo e os grãos da escória de cobre, apresentando-se como um corpo bem mais resistente quando comparado aos torrões sem escória.

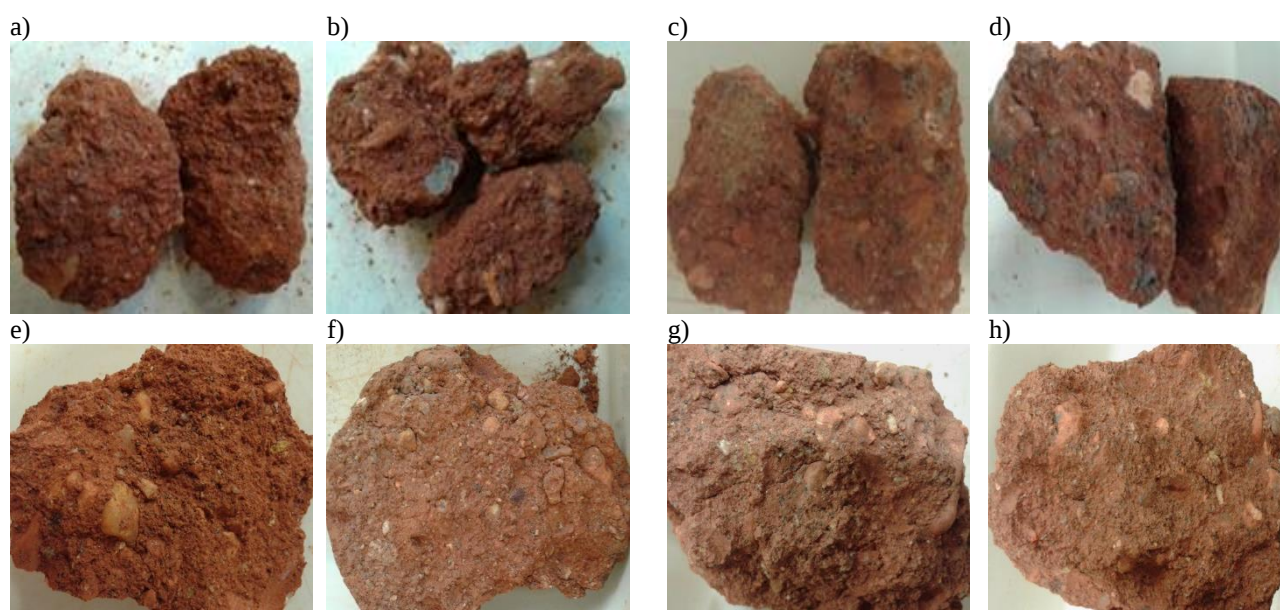


Figura 9. Torrões da mistura com solo e 3% (a), 5% (b), 7% (c), 9% de cimento (d) e solo, 10% de escória de cobre e 3% (e), 5% (f), 7% (g) e 9% de cimento (h).



Ensaio de limites de Atterberg foram realizados com amostras das misturas e os teores de cimento com o objetivo de avaliar a diminuição da plasticidade em relação ao solo *in-natura*. Para tal avaliação, as amostras foram coletadas dos corpos de prova após serem rompidos à compressão. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Limites de Atterberg do solo *in-natura* e da mistura 10% escória de cobre para os teores de cimento Portland após rompimento à compressão aos sete dias de cura.

Teor de cimento (%)	Limite de Liquidez (%)		Limite de Plasticidade (%)		Índice de Plasticidade (%)	
	E.1	E.2	E.1	E.2	E.1	E.2
SOLO IN-NATURA						
0	33	34	18	18	15	16
		33*		18*		15*
3	29	29	23	24	6	5
		29*		23*		6*
5	NP		NP		NP	
7						
9						
SOLO E 10% ESCÓRIA DE COBRE						
0	28	29	16	17	12	12
		28		17		12*
3	26	26	21	21	5	5
		26*		21*		5*
5	NP		NP		NP	
7						
9						

* média dos valores obtidos nos respectivos ensaios

Diante dos resultados desses limites, observa-se que para um teor de 3% de cimento no solo *in-natura* a plasticidade diminui fortemente e a partir de 5%, a mistura não apresenta mais essa característica, concordando com os conceitos básicos das misturas solo-cimento, em que o cimento Portland reduz a plasticidade do solo, sendo necessário tempo suficiente para ocorrer as reações de hidratação e endurecimento do cimento. Como camada de base melhorada com cimento, o teor de 3% atenderia à especificação do índice de plasticidade menor ou igual a 6% (DNIT 142/2010 – ES). É importante observar que não houve praticamente diferenças nos valores dos limites em relação ao solo *in-natura* (Tabela 1) e o solo com 0% de cimento após rompimento à compressão aos sete dias de cura. Isso indica que a aplicação da energia mecânica intermediária, na moldagem dos corpos de prova, não foi suficiente para quebrar os grãos do solo numa quantidade necessária que reduzisse a plasticidade.

Para a mistura solo e 10% escória de cobre, a adição de 3% de cimento também reduz fortemente a plasticidade abaixo de 6%. Para teores de cimento acima de 5% a mistura não apresenta plasticidade. Comparando as misturas sem e com escória, nota-se que a adição de 10% de escória diminui a plasticidade de 15% para 12% e isso se deve à granulometria da escória com elevada porcentagem da fração areia, conforme apresentado na Tabela 2. A mesma observação dos limites da mistura solo e 10% escória (Tabela 3) e a mistura com 0% de cimento após o rompimento aos sete dias de cura também é válida.

CONCLUSÕES

Os resultados e as análises realizadas neste trabalho permitem concluir que:

- ✓ a adição de 10% de escória de cobre ao solo *in-natura* contribuiu mais com a porção média da fração areia, isso devido aos 92,32% de areia presente na escória;



- ✓ adicionando-se cimento Portland ao solo no momento da compactação não gera diferenças na massa específica aparente seca máxima, mas promove uma tendência de diminuição no teor de umidade ótimo. Quando são adicionados 10% de escória essa tendência é menos significativa, porém a massa específica tem seu valor mais alto. Comparando as misturas sem e com escória, nota-se uma redução na umidade;
- ✓ adicionando-se cimento Portland ao solo aumenta-se a resistência à compressão simples, porém, não é diretamente proporcional para todos os teores, verificando-se que o crescimento é mais acentuado para teores acima de 5% de cimento. O mesmo comportamento pode ser verificado quando adicionado 10% da escória. No geral, o crescimento da resistência é bem mais acentuado quando adiciona os 10% da escória de cobre, para teores acima de 5% de cimento;
- ✓ com a adição de 10% de escória de cobre é possível reduzir o teor de cimento, considerando como resistência mínima 2,1 MPa;
- ✓ adicionando-se cimento Portland e 10% de escória de cobre ao solo observam-se as alterações devido à ação modificadora do cimento, para teores mais baixos de cimento e aglutinadora, para teores mais altos de cimento;
- ✓ adicionando-se cimento Portland ao solo observa-se a forte redução na plasticidade do solo a partir de 3% de cimento. Para as misturas com 10% de escória essa plasticidade é ainda menor. Para as misturas sem cimento, a redução não foi tão significativa, indicando que essa porcentagem de escória não foi suficiente para quebrar a coesão do solo *in-natura*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio à pesquisa de doutoramento do primeiro autor e ao laboratório GeoPav da Universidade Federal de Sergipe pelo apoio físico e técnico para realização do experimento.

REFERÊNCIAS

- Al-JABRI, K.S. et al. Effect of copper slag and cement by-pass dust addition on mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 20, p. 322-331, 2006.
- ANJOS, M.A.G. Concretos com substituição do agregado miúdo por resíduo de escória de jateamento abrasivo. São Cristóvão: UFS, 2014. (Exame de Qualificação).
- BELINCANTRA, A. et al. Estudo experimental de solos lateríticos do noroeste do Paraná aditivados com cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS, 13., 2006, Anais... 2006.
- CONCHA, L.M.C. Estudo da fadiga de duas misturas de solo-cimento. Rio de Janeiro: UFRJ, 1986. (Dissertação de Mestrado).
- CRUZ, M.L.S. Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento. Braga: Universidade do Minho, 2004. (Dissertação de Mestrado).
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM. DNER-ME 041: solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. DNER-ME 051: solos – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. DNER-ME082: solos – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. DNER-ME 093: solos – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. DNER-ME 122: solos-determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. DNER-ME 129: solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. DNER-ME 194 - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998.



- _____. DNER-ME 201: solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. DNER-ME 202: solo-cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. DNER-ME 216: solo-cimento – determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. Manual de Pavimentação. Publicação IPR – 719. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p.
- _____. DNIT 139/2010 – ES – Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de Serviço, Rio de Janeiro: IPR.
- _____. DNIT-ES 143: pavimentação – base de solo-cimento. Rio de Janeiro, 2010.
- DEPARTMENT OF THE ARMY, THE NAVY, AND THE AIR FORCE. Soil stabilization for pavements. Technical Manual N° 5-822-14 Air Force Manual N° 32-1019. Washington, DC, 1994. 57 p. Disponível em:
<http://www.wbdg.org/ccb/ARMYCOE/COETM/ARCHIVES/tm_5_822_14.pdf>. Acesso em 17 abr. 2014.
- ENAMORADO, M.A. Estudo comparativo entre o método mecânico e o método físico-químico para dosagem do solo-cimento. Rio de Janeiro: UFRJ, 1990. (Dissertação de Mestrado).
- FONSECA, A.V.; CRUZ, R.C.; CONSOLI, N.C. Strength properties of Sandy soil-cement admixtures. *Geotechnical Geology Engineering*, v. 27, p. 681-686, 2009.
- FOPPA, D. Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados. Porto Alegre: UFRGS, 2005. (Dissertação de Mestrado).
- GORAI, B.; JANA, R.K. Characteristics and utilisation of copper slag – a review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 39, p. 299-313, 2003.
- JUNG, J.G. et al. A influência do tipo de cimento na resistência à compressão simples de uma areia artificialmente cimentada. *Revista Luso-Brasileira de Geotecnia*, Portugal, n. 125, p. 87-94, jul. 2012.
- KAMBHAM, K. et al. Copper slag: optimization of productivity and consumption for cleaner production in dry abrasive blasting. *Journal of Cleaner Production*, v. 15, p. 465-473, 2007.
- MACÊDO, M.M. Solos modificados com cimento – efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos. Recife: UFPE, 2004. (Dissertação de Mestrado).
- MAKUSA, G.P. Soil stabilization methods and materials in engineering practice. Department of civil , environmental and natural resources engineering. Lulea University of Technology, 2012. Disponível em:
<https://pure.ltu.se/portal/files/42050076/Soil_stabilization_methods_and_materials.pdf>. Acesso em 3 abr. 2014.
- MARANGON, M. Utilização de solo-cimento em uma solução alternativa de estrutura de arrimo. Rio de Janeiro: PUC, 1992. (Dissertação de Mestrado).
- MOURA, W.A. Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. Porto Alegre: UFRGS, 2000. (Tese de Doutorado).
- PORTELINHA, F.H.M. et al. Influência dos mecanismos de reação nas propriedades físicas e químicas de dois solos tropicais melhorados com cimento e cal. *Revista Luso-Brasileira de Geotecnia*, Portugal, n. 124, p. 5-30, mar. 2012.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. What is soil-cement. Disponível em : <<http://www.cement.org/think-harder-concrete-/paving/soil-cement>>. Acesso em 21 mar. 2014.
- RESENDE, C.M.A. Estudo da viabilidade de incorporação de escória de cobre como agregado fino em produtos de construção. Porto, FEUP, 2009. (Dissertação de Mestrado).